

文章编号: 0258-7025(2009)02-0435-04

基于调制度比的光学三维测量轮廓术

邵双运 徐楠

(北京交通大学发光与光信息技术教育部重点实验室, 北京 100044)

摘要 复杂物体的快速三维测量是光学三维轮廓术的难题之一。提出了基于调制度比的光学三维测量新方法, 设计了基于共轴光路的测量系统。理论分析表明, 在几何光学近似下, 物体表面一点调制度比的对数与该点的高度成正比, 因此可以用调制度比作为物体高度的载体。通过标定建立高度与调制度比的查找表, 测量时利用 CCD 在两个不同的位置分别获取物体表面的光栅信息, 利用傅里叶变换方法计算相应物点的调制度并计算比值, 根据调制度比值通过查找表得到相应物点的高度信息。该方法采用共轴光路, 有效避免了阴影和遮挡问题; 采用调制度比作为物体高度测量的载体, 只需要两幅光栅图就可以得到物体的高度信息, 具有测量快速的优点。对高为 79.51 mm 的台阶测量的相对误差为 0.86%, 实验结果证实了该方法和系统的有效性。

关键词 光学测量; 三维; 调制度比; 傅里叶变换

中图分类号 TH74

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL20093602.0435

Optical Three-dimensional Profilometry Based on Modulation Ratio

Shao Shuangyun Xu Nan

(Key Laboratory of Luminescence and Optical Information of Ministry of Education,
Beijing Jiaotong University, Beijing, 100044, China)

Abstract It is difficult to measure a complex object with a deep hole quickly by traditional three-dimensional (3D) profilometry, such as phase measurement profilometry or Fourier transform profilometry. A new 3D profilometry based on fringe modulation ratio is presented and a coaxial measurement system is designed. It is proved that the fringe modulation ratio instead of phase can be used to determine the height distribution of the object because the height of a point of the object is proportional to the log value of modulation ratio of the point. A look-up table of height and modulation ratio is established through system calibration. To obtain the height map of the object, a sinusoidal grating pattern is projected onto the surface of a testing object. Two fringe images of the object are captured by CCD at two different positions. Modulation ratio is computed by Fourier analysis and the height of the point can be obtained by look-up table. The proposed 3D measurement technique can perform 3D shape measurement fast without suffering shading problem. The relative error of the measurement of a step with 79.51 mm height is 0.86%. Experimental results demonstrate that the proposed scheme can be useful for 3D shape measurement.

Key words optical measurement; three-dimensional; modulation ratio; Fourier analysis

1 引 言

物体轮廓的三维测量是现代测试技术的一个重要分支, 自 60 年代以来, 特别是 80 年代以来, 国内外学者提出了许多光学三维测量理论和方法, 也有许多成熟的商业产品问世, 在产品制造与检测、文物保护、虚拟现实得到了广泛的应用^[1]。

但是, 现有的基于三角测量原理的光学三维测量技术如相位测量轮廓术 (PMP)^[2]、傅里叶变换轮

廓术 (FTP)^[3,4] 等, 在对表面形状比较复杂的物体进行测量时经常遇到阴影、遮挡和相位展开问题。图 1 表示了阴影和遮挡的形成。由于测量系统无法获取阴影和遮挡区域的条纹图像, 导致无法测量这些区域的高度; 由于表面剧烈跳变引起的条纹采样不足, 不满足采样定理, 使相位展开变得异常困难, 导致测量误差显著增大。

为了解决这种测量难题, 先后发展了双频光栅法^[5,6]、时间相位展开法^[7]、基于格雷码的相位展开

收稿日期: 2008-08-20; 收到修改稿日期: 2008-10-25

基金项目: 北京交通大学发光与光信息技术教育部重点实验室研究基金资助项目。

作者简介: 邵双运 (1972—), 男, 博士, 讲师, 主要从事光电检测方面的研究。E-mail: shao_sy@tom.com

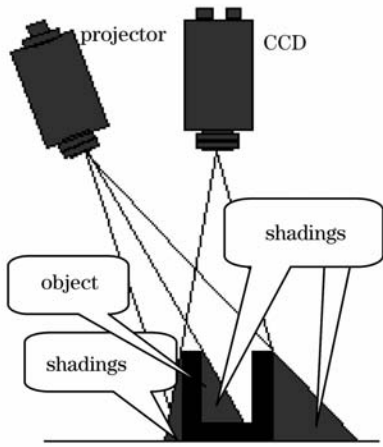


图 1 阴影和遮挡

Fig. 1 Shadings

法^[8]和基于小数重合的相位展开法^[9]等光学三维测量技术,有效解决了复杂表面的相位展开问题。但是由于三角测量法本身的限制,无法避免测量中的阴影问题,无法测量深孔类物体,为此提出了调制度测量轮廓术^[10]。该方法采用同轴光路,投影系统光轴和观察系统光轴共轴,从根本上解决了投影阴影问题;深度信息的获取依靠物面深度变化引起的条纹对比度的变化,避免了复杂表面引起的相位展开问题。但是,为了获得位置信息,需要沿物体深度方向进行一维扫描,获取系列图像,存在测量周期长的缺点。

本文针对上述问题提出一种基于投影光栅调制度比的快速光学三维测量方法,测量时只需拍摄两帧条纹图,测量速度快;利用调制度比计算物体的深度,不用求解相位和进行相位展开;测量系统采用共轴光路设计,不存在投影阴影问题。提出的测量方法既可以获取一般物体的三维轮廓,又可以对具有深孔或者深度具有剧烈跳变的物体进行三维测量,对于解决三维测量难题具有一定的参考价值。

2 测量原理

测量系统由光栅投影系统、CCD 成像系统和分光板组成,如图 2 所示。为了避免阴影问题,要求 CCD 摄像系统和光栅投影系统共轴。测量时投影系统投射正弦光栅到物体表面并保持和物体相对位置不变,先在位置 1 用 CCD 获取一帧条纹图,得到相应位置物面的调制度分布,再将 CCD 沿光轴方向平移到位置 2 获取一帧条纹图,得到位置 2 对应的调制度分布,通过匹配计算两个位置相应物点的调制度比,利用查找表得到该点的高度。

在几何光学近似下,正弦光栅通过单一透镜成

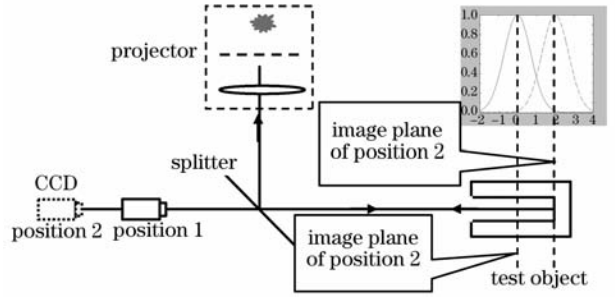


图 2 测量系统示意图

Fig. 2 Schematic of measurement system

像,在正弦光栅的成像面上,条纹对比度最大,而在成像面前后,即离焦像面上条纹对比度降低,沿光轴方向就有一个对比度分布。理论分析表明,条纹的对比度可以通过计算条纹的调制度获得,调制度与离焦量成高斯函数关系^[11],如图 3 所示。

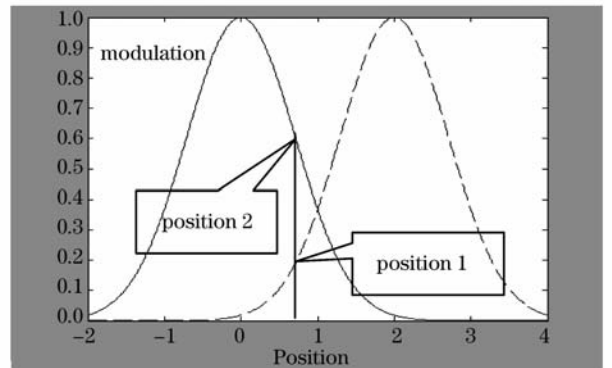


图 3 不同位置调制度分布示意图

Fig. 3 Variations of modulations at two positions

在几何光学近似下,将一正弦光栅放在 CCD 物平面的位置,考虑理想成像情况,令系统横向放大率为 M ,物表面反射率为 R ,则 CCD 像平面上的光强分布可以表示为

$$I_f(x, y) = \frac{R}{M^2} [I_0 + C \cos(2\pi f_i x_i + \phi_0)], \quad (1)$$

式中 f_i 为像平面的光栅频率, I_0 为背景光强, C 为对比度。根据成像理论可得光栅像的条纹调制度分布为^[9]

$$M(x, y; \delta) = R M_0(x, y) e^{-\frac{1}{2} f_i^2 \sigma_h^2}, \quad (2)$$

$M_0(x, y)$ 为成像面上的调制度分布,是函数的最大值。由(2)式可知,正弦条纹的调制度分布在光栅成像面前后满足高斯函数形式。由于点扩散常数 σ_h 与模糊斑半径 r 成正比, r 与离焦量 δ 成正比,令 $\delta = d(x, y) - d_i$, $d(x, y)$ 为待测点到参考平面的距离, d_i 为条纹的成像面到参考平面的距离,也就是调制度最大值的位置,则(2)式可以改写为

$$M(x, y) = R(x, y) M_0(x, y) e^{-\frac{1}{2} f_i^2 [d(x, y) - d_i]^2}, \quad (3)$$

c 为比例系数,由系统决定。

(3)式两边求对数可得

$$\ln \frac{M(x,y)}{R(x,y)M_0(x,y)} = -\frac{c}{2} f_i^2 [d(x,y) - d_1]^2. \quad (4)$$

如图2所示,设位置1和位置2到参考平面的距离差为 Δ ,则位置1的条纹调制度和位置2条纹调制度比为

$$\ln \frac{M_1(x,y)}{M_2(x,y)} = \frac{c}{2} f_i^2 [\Delta^2 - 2d_1(x,y)\Delta + 2\Delta d_1], \quad (5)$$

d_1 为待测点到参考平面的距离。

由(5)式可知,条纹调制度比 $M_1(x,y)/M_2(x,y)$ 与物体表面的反射率无关,只与物点的位置 d_1 有关。因此,只要通过标定建立调制度比与 d_1 的对应关系,像面坐标与空间坐标的关系,就可以由测量系统获取的条纹图像计算物点 (x,y) 的深度信息。

3 系统的标定

3.1 系统的组成

测量装置如图4所示,将 CCD 放在电动平移台上,沿着系统光轴方向移动,投影系统 LCD 通过分束镜与 CCD 共轴。测量时保持待测物体与 LCD 的相对位置不变,CCD 分别在两个位置拍摄物体表面光栅像,经过匹配找出对应物点的调制度比,通过查找表获得物体的高度信息。

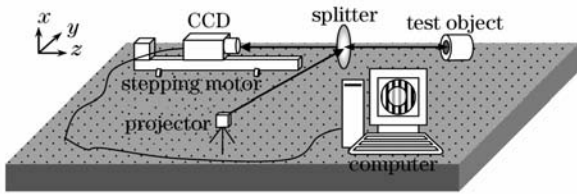


图4 测量装置示意图

Fig.4 Experimental setup

3.2 系统的纵向标定

标定分为纵向标定和横向标定,通过纵向标定建立调制度比与高度间对应关系,通过横向标定建立平面坐标与待测物体横向尺寸的对对应关系。本文只讨论系统的纵向标定。

标定时将一标准平面垂直光轴放置在测量视场范围内,利用电动平移台沿光轴方向等间隔移动 N 次,如图5所示。在每一个标定位置,投影系统向标定板投射正弦光栅,CCD 采集物面条纹图像,利用傅里叶变换方法计算当前位置标定板上所有点的调制度值;保持标定平板与 LCD 相对位置不变,沿光

轴方向平移 CCD 60 mm,再次投射光栅并采集条纹图,计算调制度并记录标定平板相对 LCD 的位置,计算调制度比值并取对数,之后将 CCD 移回原来的位置,完成该位置的标定。将标定平板移动 20 mm 重复上述过程直到标定结束。对得到的一组调制度比值和物体高度进行曲线拟合,建立对应于 CCD 像面各像素点的调制度比值与测量点空间坐标之间的对应关系存入测量系统中,完成纵向标定。图6是(100,200)像素点的标定曲线。

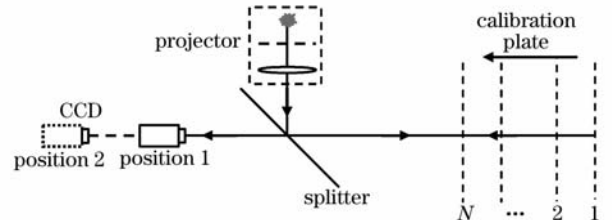


图5 系统的标定

Fig.5 System calibration

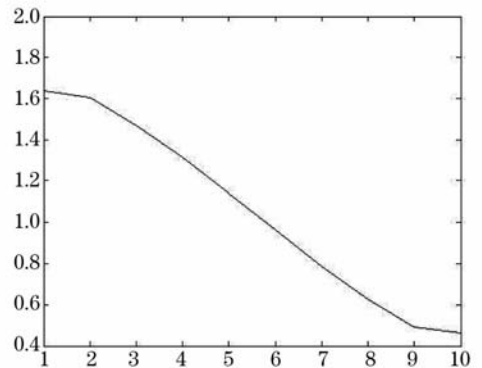


图6 (100,200)像素点的标定曲线

Fig.6 Calibration plot of pixel (100, 200)

4 测量实例

为验证系统的有效性,分别利用图4所示测量装置对台阶状物体进行了测量。测量时使用 CCD 采集条纹图,经过 Hanning 滤波、均值调整、归一化和小波分析等处理之后,利用傅里叶变换计算出一帧物体表面的调制度分布。然后将投影系统沿光轴移动60 mm,重复上述过程,计算出物体的第二个调制度值,求得物面各点的调制度比值。根据纵向标定得到的调制度比值与高度的对应关系,求出待测物体的表面高度信息。

图7是对一高度为80.20 mm(游标卡尺测量结果)的刚性量块的测量结果。被测物体的背景平面高度为20.54 mm,量块上表面高度为100.05 mm,量块高度为79.51 mm,绝对误差为0.69 mm,相对误差0.86%。图8是对棱柱的测量结果。

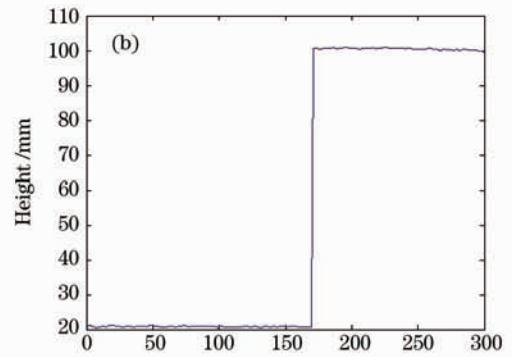
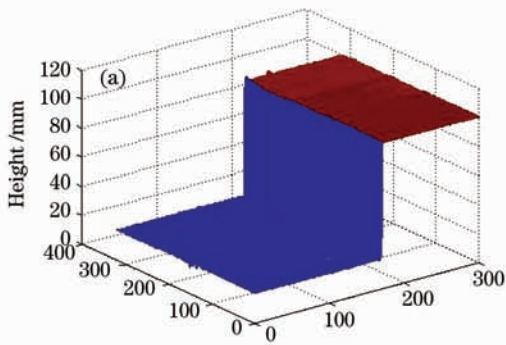


图 7 测量结果。(a) 三维视图;(b)第 100 像素行的剖面图

Fig. 7 Results of measurement. (a) 3D mesh; (b) section plot of 100th pixel line

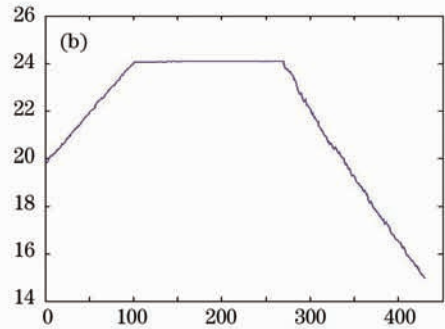
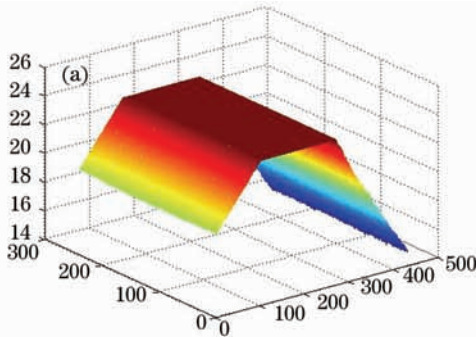


图 8 棱柱的测量结果图

Fig. 8 Measurement result of a prism

5 结 论

测量误差主要来源于投影系统。本文采用的投影系统是商用 LCD 投影仪,经过测试发现其投射的光强随时间有一定的波动,这给调制度的计算带来了误差;另外,由于 LCD 投影仪的非线性响应,正弦光栅经 LCD 投射后到达物体表面的光栅有一定的非正弦性,这将影响调制度的计算精度,最终影响测量结果。

本文获取调制度的方法是通过移动 CCD 来实现的。根据测量原理,也可以通过移动投影系统得到调制度,避免了像素的匹配,加快了数据处理速度,关于这种调制度的实现方法将另文讨论。

本文提出的基于调制度的快速三维轮廓术避免了阴影、遮挡、相位截断等问题;同时克服了调制度三维轮廓术测量时间过长的缺点,是一种简单、快速的三维测量方法。

参 考 文 献

- 1 Frank Chen, Gordon M. Brown, Mumin Song. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods [J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(1):10~22
- 2 Xianyu Su, Xianyu Su, Yiping Cao *et al.*. Phase-height mapping and coordinate calibration simultaneously in phase-measuring profilometry [J]. *Opt. Eng.*, 2004, **43**(3):708~712
- 3 M. Takeda, K. Mutoh. Fourier transform profilometry for the automatic measurement 3-D object shapes [J]. *Appl. Opt.*,

1983, **22**:3977~3982

- 4 Mao Xianfu, Su Xianyu, Chen Wenjing *et al.*. Analysis on measurement method of improved Fourier transforms profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7):1291~1295
- 毛先富,苏显渝,陈文静等.改进傅里叶变换轮廓术的测量算法研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7):1291~1295
- 5 Zhang Nanyangsheng, Yang Kuntao. Three-dimensional measurement technology based on virtual grating of double frequency [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10):1407~1411
- 张南洋生,杨坤涛.双频虚拟光栅投影三维测量技术[J]. *中国激光*, 2006, **33**(10):1407~1411
- 6 Li Jianbing, Lei Zhihui. Phase amending of projected double spacial frequency fringes with Bayes estimation method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3):393~397
- 李健兵,雷志辉.利用贝叶斯估计法对双频投影条纹的相位进行修正[J]. *光学学报*, 2006, **26**(3):393~397
- 7 Kinell Lars. Multichannel method for absolute shape measurement using projected fringes [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, **41**:57~71
- 8 Sitnik, Robert, Kujawinska *et al.*. Digital fringe projection system for large-volume 360-deg shape measurement [J]. *Opt. Eng.*, 2002, **41**(2):443~449
- 9 Hao Yudong, Zhao Yang, Li Dacheng. Nonlinear excess fraction method and its applications to profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(11):1518~1522
- 郝煜栋,赵洋.非线性小数重合法及其在轮廓测量中的应用[J]. *光学学报*, 1999, **19**(11):1518~1522
- 10 Shuangyun Shao, Xianyu Su, Qican Zhang *et al.*. Complex object shape measurement using modulation measurement profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(12):1623~1628
- 邵双运,苏显渝,张启灿等.调制度测量轮廓术在复杂形测量中的应用[J]. *光学学报*, 2004, **24**(12):1623~1628
- 11 Shao Shuangyun. Applied Study on Modulation Measurement Profilometry[D]. Chengdu: Sichuan University, 2004. 40~46
- 邵双运.调制度测量轮廓术应用研究[D].成都:四川大学, 2004. 40~46